抗旱优良红砂家系的早期选择与评价①

李佩佩， 李 毅， 苏世平， 种培芳， 李 珍
（甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 本实验于武威市凉州区育苗建立试验地，分别在 2014、2015、2016、2017、2018 年 7 月，以红砂家系（2 a、3 a、4 a、5 a、6 a 生红砂）叶片为试验材料，测定叶片中可溶性蛋白（SP）、可溶性糖（SS）、丙二醛（MDA）、脯氨酸（Pro）、叶绿素 a（Chl a）、叶绿素 b（Chl b）、总叶绿素（Chl a + b）、叶绿素 a/b（Chl a/b）和叶绿素荧光等 16 个指标，连续 5 a 研究红砂家系抗旱性早期选择可行性及性状表现稳定性，选择和综合评价抗旱优良红砂家系。结果表明：可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸及叶绿素荧光相关指标在 77 个红砂家系间存在较大的差异，为抗旱优良红砂家系选择创造条件；通过 5 a 连续观察及测定，2 a、3 a、4 a 生红砂家系综合排序逐年表现稳定，重合率逐渐增加至 83.33%，5 a、6 a 生各层次红砂家系表现稳定，重合率大于 83.33%；经过综合分析筛选出小甘沟 – 3 号（XGG – 3）、巴彦浩特 3 – 4 号（BYHT – 3）、乌达 – 1 号（WD – 1）、泉眼山 – 2 号（QYS – 2）、海石湾 – 1 号（HSW – 1）等 5 个优良抗旱家系，入选率为 6.49%。

关键词： 抗旱性；早期选择；红砂家系；评价

红砂（*Reaumuria soongorica*），其分布于荒漠、半荒漠、戈壁等地，具有很强抗旱、耐盐和集沙能力[1–2]，是我国温带、草原化荒漠主要植被类型之一，也是重要防风固沙植物[3–4]。近年来，红砂抗旱性机理[2,4–5]与评价[6–7]越来越受到关注和重视；红砂抗旱优良种源[7–9]与家系选择[8–10]工作也取得了初步成果。

植物抗旱能力判定是一个综合过程，研究植物抗旱性对一些抗旱性良好的植物种源及家系进行筛选和培育就成为了现代植物研究工作中亟待解决的问题[11–12]。对于林木抗旱性评价多以生理指标[7,13]如叶绿素 Chl、可溶性蛋白质 SP、可溶性糖 SS、游离脯氨酸 Pro、丙二醛 MDA 等，光合荧光指标[6–8]如光合量子效率 AQY、暗呼吸速率 R_d、光补偿点 LCP、光饱和点 LSP、最大净光合速率 P_{nmax}、PSⅡ最大光化学效率 F_v/F_m 等为基础，而 2014—2016 年试验对生长指标、生理指标及荧光指标测定分析发现[8,10]，部分指标与红砂抗旱性强弱有较大相关性，因此，本试验选取 SP、SS、MDA、Pro、Chl a + b、Chl a、Chl b、Chl a/b、稳态荧光产量 F_s、最大荧光产量 F_m、初始荧光 F_o、可变荧光 F_v、PSⅡ最大光化学量子产量 Q_Y、光化学淬灭系数 qP、非光化学淬灭系数 NPQ、PSⅡ的潜在活性 F_v/F_o 等 16 个影响较大指标进行测定。采用综合分析方法如隶属函数法[14]或主成分分析法[8,15]，在尽量不损失有效信息条件下，对多个指标进行高度概括，对植株抗旱性进行综合分析评价。

林木性状早期选择是缩短林木育种周期，加速选择进程的重要措施[13]。研究证明乔木以生理[16–17]、形态[18–19]或分子[20–21]等指标进行早期评价具有可行性。以往对红砂在种源[9]、家系[8,10]等方面利用生理指标或者荧光指标做优良家系早期选择的相关研究，筛选出 12 个优良家系。但是，较少有该树种在同一生境条件、不同苗龄下对红砂的生理特性、优良家系筛选及早期选择性状稳定等方面进行综合评价和分析。

本试验在前人[8,10]研究基础上，以 77 个红砂家系为研究对象，以叶片生理指标和相关荧光参数为主要指标，通过对之前研究成果整理分析，探讨不同种源的红砂家系在同一生境下是否能够根据主成分分析法筛选出具有优良抗旱性的家系，指导红砂家系选择；经过数年的选择，评价抗旱优良家系是否稳

① **收稿日期：** 2019 – 08 – 28； **修订日期：** 2019 – 10 – 16
基金项目： 科技厅国际合作项目 17YF1WA161（033118）；科技厅创新基地与人才计划 17JR7WA018（033119）；教育厅科技成果转化项目 2017D-14（041033）资助
作者简介： 李佩佩（1994 – ），女，硕士研究生，研究方向为抗旱灌木良种选育．E-mail：562396447@qq.com
通讯作者： 李毅．E-mail：liyi@gsau.edu.cn

表 1 红砂采样地概况

Tab. 1 Overview of *Reaumuria soongorica* sampling plots

编号	地点	土壤和优势种	海拔/m	经纬度
BYHT	内蒙古巴彦浩特	盐爪爪为优势种,干滩红砂为优势种	1 441	103°1′3″E,36°15′22″N
HG	甘肃红古	靠河岸,红砂为优势种	1 711	103°5′35″E,38°36′32″N
HSW	甘肃海石湾	红砂为优势种	1 867	102°52′59″E,36°21′0″N
HSZ	甘肃黑山镇	砂土,红砂为优势种	1 453	102°54′4″E,38°21′18″N
MJW	宁夏孟家湾	红砂为优势种	1 470	104°54′43″E,37°26′6″N
MQXX	甘肃民勤新西	红砂为优势种	1 336	103°20′2″E,38°52′41″N
QYS	宁夏泉眼山	红砂为优势种	1 203	105°33′40″E,37°29′20″N
SSC	宁夏砂石场	草原化荒漠,红砂为优势种	1 719	104°25′59″E,37°27′50″N
SMY	宁夏四马营	以盐爪爪和红砂为优势种	1 134	106°0′40″E,38°30′7″N
WD	内蒙古乌达	戈壁,砾石,砂土,红砂为优势种	1 083	106°46′8″E,39°32′20″N
SWS	甘肃民勤苏武山	以盐爪爪和红砂为优势种	1 450	103°12′22″E,38°31′23″N
WWYH	甘肃武威盐湖	砂土、砾石,红砂为优势种	1 427	102°50′56″E,39°19′37″N
ZYGZ	甘肃张掖甘州	红砂为优势种	1 329	100°36′0″E,39°28′48″N
JQJT	甘肃酒泉金塔	砾石,砂土,红砂为优势种	1 368	98°53′35″E,39°54′18″N
JQGZ	甘肃酒泉瓜州	红砂为优势种	1 605	100°53′28″E,39°54′43″N
SGK	宁夏三关口	以盐爪爪和红砂为优势种	1 327	103°53′17″E,38°21′54″N
XGG	甘肃小甘沟	黄土,砾石,红砂为优势种	2 138	103°53′31″E,36°54′22″N
NMYH	内蒙古盐湖	干滩以红砂为优势种	1 338	105°20′49″E,37°57′0″N
THCY	内蒙古通湖草原	红砂为优势种	1 286	104°58′44″E,37°35′53″N
ZZG	甘肃扎子沟	砾石,砂土,红砂为优势种	1 379	103°5′35″E,38°36′32″N

定,为选育和推广红砂抗旱优良家系提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地选择在凉州区羊下坝镇(38°24′N,103°9′E),海拔 1 378 m,平均土壤含水量 0.4%,土壤为碱性砂壤,属川区地带,紧靠腾格里沙漠边缘,干旱少雨[22-23],平均降雨量 113.2 mm,多集中于 7—9 月;年蒸发量 2 604.3 mm。

1.2 田间设计与试验材料

材料来自 23 个种源(表 1),1 380 个单株。2012 年 1 月在试验地的大棚中进行穴盘育苗,获得 1 380 个家系。2013 年 4 月采用随机区组试验设计,3 个重复,株行距 0.5 m×1.5 m,定植,最终保存 1 196 个家系。按常规水肥管理措施进行栽培管理。

2014 年选择 77 个红砂家系作为第 1 批家系,每个家系随机选择 3 个单株共计 231 个红砂植株进行测定;2015、2016 年继续测定以上红砂家系,在其中筛选出优良、普通、较差 3 个层次红砂家系共 36 个家系 108 个单株作为第 2 批经过家系选择后所得到的红砂家系;2017 年则测定第 2 批 36 个红砂家系 108 单株;2018 年在第 2 批基础上再次进行家系早期选择,选出第 3 批红砂家系 3 个层次共 18 个红砂家系 54 个单株继续测定。

1.3 测定指标及方法

2014—2018 年的每年 7 月在试验地采取红砂叶片,每个家系选取 3 株为重复,进行标记,立刻装入液氮罐,带回实验室待测。

可溶性蛋白(SP)采用考马斯亮蓝 G-250 染色法[24];可溶性糖(SS)含量采用蒽酮比色法[25];游离脯氨酸(Pro)含量采用磺基水杨酸提取法[26];叶绿素(Chl)相关指标采用丙酮比色法测定[27];丙二醛含量(MDA)采用硫代巴比妥酸比色法[27]。

叶绿素荧光采用 Fluor Cam 便携式叶绿素荧光成像仪测定相关指标[28-30]。

1.4 数据处理

数据处理采用 Excel 2007 和 SPSS 22.0,采用主成分分析法对红砂家系进行综合评价;对比分析年际间评价结果,按其综合排序后各层次重合率进行选择,以此筛选抗旱优良红砂家系。

2 结果与分析

2.1 77 个红砂家系抗旱指标

根据累计贡献率大于85%的原则(表2)选择

表 2　77 个红砂家系主抗旱指标主成分分析

Tab. 2　Principal component analysis of main drought resistance indexes of 77 *Reaumuria soongorica* families

指标	主成分载荷系数				
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5
叶绿素 b Chl b	0.846	0.077	-0.190	-0.357	-0.242
叶绿素(a+b) Chl(a+b)	0.883	0.182	-0.183	-0.251	-0.140
叶绿素 a Chl a	0.870	0.228	-0.173	-0.188	-0.084
叶绿素 a/b Chl(a/b)	-0.608	0.086	0.304	0.296	0.313
可溶性蛋白质 SP	0.565	-0.071	-0.146	0.718	0.115
游离脯氨酸 Pro	0.618	0.199	-0.299	0.358	0.379
可溶性糖 SS	0.198	-0.089	0.485	0.221	-0.643
丙二醛含量 MDA	-0.203	-0.306	0.686	-0.101	0.371
稳态荧光 F_s	0.975	-0.173	0.053	0.060	0.017
最大荧光产量 F_m	0.972	0.171	0.003	0.071	0.017
最小荧光 F_o	0.972	-0.008	-0.087	0.132	0.060
最大量子产量 F_v	0.963	0.219	0.028	0.053	0.059
光化学淬灭系数 qP	-0.831	0.489	-0.205	0.028	-0.010
最大光化学效率 Q_Y	0.586	0.574	0.549	-0.017	0.007
非光化学淬灭系数 NPQ	0.458	-0.050	0.002	-0.497	0.506
PSⅡ的潜在活性 F_v/F_o	0.596	0.625	0.467	-0.073	0.001
特征值	12.406	2.393	1.602	1.369	1.199
贡献率/%	59.075	11.394	7.628	6.518	5.709
累计贡献率/%	59.075	70.468	78.096	84.615	90.323

前 5 个主成分来分析,其累计贡献率是 90.323%,说明这 5 个主成分可以代表所有指标进行红砂家系间评价。第一主成分主要为 F_s、F_m、F_o、F_v、Chla+b,特征值为 12.406,说明叶绿素荧光作为植物光合作用研究的探针,不仅能反映光能吸收、光化学反应和激发能传递等光合作用的原初反应过程,且与质子梯度的建立、电子传递及二氧化碳(CO_2)固定和腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)合成等过程相关,对红砂抗旱性能有着重要作用;第二主成分主要为 F_v/F_o、Q_Y、qP、F_v、Chl a,特征值为 2.393,说明在干旱条件下,红砂通过调节 PSⅡ的潜在活性、光化学淬灭系数及叶绿素等来维持植物正常生理活动,在红砂抗旱性中起一定作用;第三主成分主要为 MDA、SS、Chl a/b、Q_Y、F_v/F_o,特征值为 1.602,通过 MDA 了解细胞膜脂过氧化程度,以间接测定膜系统受损程度以及红砂家系抗旱性,而 SS 在干旱条件下通过降低脱水或者细胞质结晶而保护细胞膜完整功能,以此来影响红砂抗旱性;第四主成分主要为 SP、Pro,特征值为 1.369,在干旱胁迫下,SP、Pro 等物质主动积累,降低红砂体内渗透势,使其继续吸水,防止脱水,增强红砂抗旱性;第五主成分主要为 NPQ、MDA、Pro,特征值为 1.199,通过非化学淬灭系数的增加或降低,增强红砂自身光保护能力及降低渗透势,防止脱水。

2.2　2014—2016 年 77 个红砂家系选择

77 个红砂家系通过测定 Chl a、Chl b、Chl a+b、Chl a/b、Pro、SS、SP、MDA 等 8 个间接指标,通过主成分分析法,在尽量不损失有效信息的前提下,将所选全部指标经高度概括后降维转化为几个相互独立的综合指标,来更好地评价 77 个家系的综合抗旱能力,用主成分分析法得出红砂家系的综合得分排序,排名越靠前则表明该家系抗旱能力越强。由表 3 得,2 a 生红砂家系进入前 11 排序是:HG-3 > HSW-1 > XGG-3 > QYS-2 > ZZG2-3 > BYHT-3 > ZZG1-2 > ZZG1-1 > HSZ-3 > WD-1 > XKK-4;3 a 生红砂家系排序是:XGG-3 > BYHT-3 > WD-1 > QYS-2 > HSW-1 > ZZG1-1 > ZZG2-3 > HG-3 > XGG-1 > ZZG1-2 > LZ-1;4 a 生红砂家系排序是:XGG-3 > BYHT-3 > WD-1 > QYS-2 > HSW-1 > ZZG2-3 > XGG-1 > ZZG1-2 > ZZG1-1 > LZ-1 > HG-3。

2 a 与 3 a、4 a 生红砂家系在排序上有所不同,即在抗旱性能力上 2 a 和 3 a、4 a 生红砂家系可能略有差异,而 3 a、4 a 生红砂家系排序则比较一

表 3　前 3 a 筛选得出红砂抗旱优良家系主成分综合得分

Tab. 3　The comprehensive scores of principal components of drought-resistant superior families of *Reaumuria soongorica* were obtained in the first 3 years

2 a 生家系	综合得分	3 a 生家系	综合得分	4 a 生家系	综合得分	排序	2 a 生家系	综合得分	3 a 生家系	综合得分	4 a 生家系	综合得分	排序
HG-3	1.60	XGG-3	3.46	XGG-3	1.96	1	MJW-1	-0.03	JQJT-1	0	SD-3	-0.11	40
HSW-1	1.15	BYHT-3	1.12	BYHT-3	1.45	2	BYHT-2	-0.04	MQXX-1	-0.01	SSC-3	-0.12	41
XGG-3	0.97	WD-1	1.06	WD-1	1.32	3	SWS-1	-0.05	NMYH-1	-0.02	JQJT-1	-0.13	42
QYS-2	0.95	QYS-2	1.05	QYS-2	1.21	4	ZZG2-1	-0.07	ZZG2-2	-0.02	MJW-1	-0.13	43
ZZG2-3	0.82	HSW-1	0.80	HSW-1	1.19	5	JQJT-2	-0.07	SSC-2	-0.02	ZZG2-2	-0.14	44
BYHT-3	0.81	ZZG1-1	0.79	ZZG2-3	1.07	6	WD-3	-0.08	MJW-1	-0.03	NMYH-1	-0.14	45
ZZG1-2	0.76	ZZG2-3	0.66	XGG-1	1.05	7	JQJT-1	-0.09	MQXX-2	-0.03	SSC-2	-0.15	46
ZZG1-1	0.75	HG-3	0.48	ZZG1-2	0.85	8	SGK-2	-0.11	HSW-3	-0.04	SGK-2	-0.15	47
HSZ-3	0.74	XGG-1	0.46	ZZG1-1	0.72	9	JQGZ-4	-0.14	HSW-4	-0.04	HSW-4	-0.16	48
WD-1	0.69	ZZG1-2	0.45	LZ-1	0.60	10	HSW-3	-0.17	ZYGZ-2	-0.05	SGK-3	-0.24	49
XKK-4	0.62	LZ-1	0.38	HG-3	0.6	11	HSW-4	-0.17	HSZ-1	-0.05	HSW-3	-0.25	50
SD-1	0.62	HSZ-3	0.35	HSZ-3	0.48	12	SGK-3	-0.18	XGG-2	-0.05	LZ-3	-0.26	51
LZ-1	0.59	ZZG2-1	0.34	XKK-4	0.46	13	XGG-2	-0.19	SD-3	-0.06	ZYGZ-2	-0.26	52
JQGZ-2	0.58	XKK-4	0.33	ZZG2-1	0.44	14	XGG-1	-0.21	WD-3	-0.06	JQJT-3	-0.29	53
SJZ-3	0.55	SD-1	0.32	SD-1	0.38	15	SD-3	-0.23	SGK-2	-0.09	HSZ-1	-0.30	54
ZZG2-4	0.54	SJZ-3	0.29	ZYGZ-1	0.36	16	THCY-4	-0.23	JQJT-3	-0.10	MQXX-2	-0.31	55
ZYGZ-1	0.50	ZYGZ-1	0.28	SJZ-3	0.33	17	LZ-3	-0.25	SGK-3	-0.11	XGG-2	-0.32	56
SGK-1	0.49	BYHT-4	0.26	ZZG2-4	0.31	18	MQXX-2	-0.26	LZ-3	-0.12	WD-3	-0.33	57
HSZ-2	0.47	ZZG2-4	0.26	BYHT-4	0.31	19	JQJT-3	-0.26	THCY-4	-0.12	THCY-4	-0.37	58
BYHT-4	0.41	HSZ-2	0.23	HSZ-2	0.30	20	HSZ-1	-0.28	HG-1	-0.14	JQGZ-4	-0.38	59
JQGZ-1	0.41	WD-2	0.23	JQGZ-2	0.27	21	ZYGZ-2	-0.29	JQGZ-3	-0.15	JQGZ-3	-0.40	60
SD-4	0.37	JQGZ-2	0.19	WD-2	0.25	22	JQGZ-3	-0.30	SWS-2	-0.15	SD-2	-0.41	61
WD-2	0.34	SD-4	0.19	SGK-1	0.24	23	SD-2	-0.31	JQGZ-4	-0.16	HG-1	-0.41	62
SSC-3	0.24	ZYGZ-3	0.17	JQGZ-1	0.23	24	LZ-2	-0.36	WWYH-	-0.19	WWYH-	-0.41	63
HSW-2	0.23	HSW-2	0.16	SD-4	0.23	25	MJW-2	-0.37	SD-2	-0.20	SWS-2	-0.45	64
MQXX-1	0.23	SGK-1	0.16	ZYGZ-3	0.19	26	WWYH-	-0.38	WWYH-	-0.21	WWYH-	-0.47	65
THCY-1	0.22	JQGZ-1	0.16	HG-2	0.18	27	SMY-2	-0.39	SMY-1	-0.21	BYHT-1	-0.49	66
SGK-4	0.16	QYS-3	0.16	HSW-2	0.17	28	SWS-2	-0.39	THCY-3	-0.22	THCY-3	-0.49	67
QYS-3	0.12	HG-2	0.14	THCY-1	0.16	29	HG-1	-0.39	SMY-4	-0.23	SMY-4	-0.51	68
ZYGZ-3	0.11	THCY-1	0.13	THCY-2	0.16	30	SMY-1	-0.39	QYS-4	-0.23	HSZ-4	-0.51	69
SSC-2	0.09	BYHT-2	0.10	QYS-3	0.14	31	WWYH-	-0.40	BYHT-1	-0.25	LZ-2	-0.53	70
THCY-2	0.09	SGK-4	0.09	SGK-4	0.12	32	SMY-3	-0.43	MJW-2	-0.26	HG-4	-0.54	71
NMYH-1	0.08	SWS-1	0.08	SSC-1	0.08	33	BYHT-1	-0.44	SMY-2	-0.27	SMY-3	-0.56	72
ZZG2-2	0.07	THCY-2	0.06	BYHT-2	0.02	34	THCY-3	-0.44	JQJT-2	-0.28	QYS-4	-0.61	73
SSC-1	0.07	SSC-1	0.05	SWS-1	-0.01	35	SMY-4	-0.44	HG-4	-0.29	MJW-2	-0.73	74
HG-2	0.03	MQXX-3	0.04	QYS-1	-0.02	36	QYS-4	-0.44	HSZ-4	-0.30	JQJT-2	-0.73	75
QYS-1	0	XGG-4	0.03	XGG-4	-0.04	37	HG-4	-0.45	SMY-3	-0.36	SMY-1	-0.79	76
MQXX-3	-0.02	QYS-1	0.03	MQXX-3	-0.07	38	HSZ-4	-0.46	LZ-2	-0.37	SMY-2	-0.87	77
XGG-4	-0.02	SSC-3	0.01	MQXX-1	-0.09	39							

致,即在抗旱能力上 3 a、4 a 生红砂家系表现稳定。

2.3　2017—2018 年红砂抗旱优良家系选择

从表 4 得知,5 a 生优良红砂家系排序是:XGG-3 > BYHT-3 > QYS-2 > HSW-1 > WD-1 > ZZG2-3;6 a 生优良红砂家系排序是:XGG-3 > BYHT-3 > WD-1 > QYS-2 > ZZG2-3 > HSW-1。这 2 a 红砂家系在优良、普通或者较差家系选择结果都较为一致,仅顺序次位稍有差异。

2.4　2014—2018 年红砂抗旱优良家系选择与重合率对比

对 2014—2018 年所有红砂家系进行对比。在红砂不同树龄的生长阶段中,按照比例,利用测定指

表4　5 a、6 a 生筛选得出红砂抗旱优良家系主成分综合得分

Tab. 4　The comprehensive scores of principal components of drought-resistant superior families of *Reaumuria soongorica* were obtained through screening of 5 a and 6 a generations

	5 a生红砂家系主成分分析		6 a生红砂家系主成分分析		综合排序
	家系	综合得分	家系	综合得分	
优良家系	XGG－3	1.06	XGG－3	1.22	1
	BYHT－3	0.99	BYHT－3	1.15	2
	QYS－2	0.77	WD－1	0.69	3
	HSW－1	0.75	QYS－2	0.61	4
	WD－1	0.72	ZZG2－3	0.52	5
	ZZG2－3	0.71	HSW－1	0.14	6
普通家系	MQXX－3	0.04	QYS－1	0.07	7
	BYHT－2	0.03	SSC－3	0.05	8
	QYS－1	0.02	MQXX－3	－0.04	9
	MJW－1	0.01	XGG－4	－0.14	10
	SSC－2	0	MJW－1	－0.28	11
	XGG－4	－0.03	SSC－2	－0.38	12
较差家系	QYS－4	－0.70	SMY－2	－0.54	13
	MJW－2	－0.80	HSZ－4	－0.55	14
	SMY－2	－0.82	SMY－3	－0.56	15
	HG－4	－0.84	QYS－4	－0.57	16
	HSZ－4	－0.86	MJW－2	－0.63	17
	SMY－3	－1.22	SMY－1	－0.74	18

表5　2014—2018 年红砂家系重合率对比

Tab. 5　Comparison of repeat rates of *Reaumuria soongorica* families in 2014－2018 years　/%

树龄	品质	3 a生	4 a生	5 a生	6 a生
2 a生	优良	66.67	83.33	83.33	83.33
	普通	50	50	83.33	66.67
	较差	33.33	16.67	50	33.33
3 a生	优良		83.33	83.33	83.33
	普通		83.33	50	66.67
	较差		50	66.67	50
4 a生	优良			100	100
	普通			50	66.67
	较差			66.67	83.33
5 a生	优良				100
	普通				83.33
	较差				83.33

标进行主成分分析，对2014—2016年红砂植株分成优良、普通和较差家系，2 a生红砂植株与3 a、4 a生优良抗旱红砂家系重合率从66.67%升高至83.33%，普通红砂抗旱家系重合率从50%达到83.33%，较差红砂家系重合率从16.67%到50%。2017—2018年红砂植株是从前3 a的77个家系中分析选择的第2批、第3批红砂家系，5 a与6 a生再次选择的优良抗旱红砂家系重合率从83.33%升高至100%，普通红砂抗旱家系重合率从50%达到83.33%，较差红砂家系重合率从33.33%到83.33%。从其他树龄与6 a生红砂各层次选择的家系重合率可知，重合率均是稳定的增长，红砂家系从2 a生至6 a生植株见表5。

3　讨 论

枫香（*Liquidambar formosana*）[31]、赤桉（*Eucalyptus camaldulensis*）[32]、红皮云杉（*Picea koraiensis*）[33]等在早期选择中依靠植株胸径、株高和材积来综合评价家系是否优良，由此，单一试验指标作为选育优良家系标准，其结果可能会出现一定偏差，且随着林龄增长而产生变化，因而，在选育过程中若兼顾不同指标，评价结果可能会比较可靠。林木优良家系评价指标选择就显得尤为重要，王志昊[34]在几种沙生植物抗旱性评价中对小檗（*Berberis amurensis*）、黄柳（*Salix gordejevii*）、杠柳（*Periploca sepium*）、蛇葡萄（*Ampelopsis bodinieri*）、乌柳（*Salix cheilophila* Schneid）、沙柳（*Salix psammophila*）等6种沙生植物通过测定其荧光指标、生化指标等做抗旱性评价，在黄樟（*Cinnamomum porrectum*）[35]优良家系评价中则选择多个生长指标来评价。这与本试验相似，选用多指标对红砂家系抗旱性进行综合评价。对类似于白刺（*Nitraria tangutorum*）[23]、小檗（*Berberis amurensis*）[34]等小灌木其材积、树高、胸径等在短时间内变化不明显，而其生理指标、光合和荧光参数等差异明显，且对于植株抗旱性有较大影响，这一结论已被前人研究证明[36－37]。之前红砂抗旱性评价选择采用荧光参数[7]、渗透调节物质[18]等指标来评价，认为以这些指标为基础来进行红砂早期选择具有一定可行性，而本试验也得出生理指标和荧光指标皆能较好评价红砂家系抗旱性能。王志昊[34]评价沙生植物抗旱性时对以上指标与抗旱性之间的联系进行了阐述；种培芳等[7]在4个地理种群红砂抗旱性综合评价中提出渗透调节物质更能评价植物抗旱性，这与本试验选取的指标相符。而大量试验证明主成分分析法[8]和隶属函数

法[20-21]具有异曲同工之妙,皆认为以植物抗旱性指标为基础进行综合评价排序是可行有效的[37-38],这与本试验对家系测定后,采取对实验数据降维想法,采用因子分析对多个相关性指标转化成几个互相独立综合指标进行评价,得出结果也一致。

77个不同红砂家系、231个单株全部测定到选择的36个家系、108个红砂单株最终有目的测定得到18个家系、54个各层次红砂单株,得出在同一生境下确实能够根据上面16个相关指标筛选出优良红砂抗旱家系,且经过主成分分析,从2 a、3~4 a、5 a和6 a生红砂家系排序对比发现,家系在2 a、3 a时排序变化波动较大,家系表现优异与否不够稳定,这可能与植株树龄较幼,对于环境及其他因素未完全适应有关,性状不够稳定,因此,该阶段可能不是选择优良家系的最佳树龄。北美鹅掌楸(*Liriodendron tulipifera*)也表明,早期个体分化较大,不宜过早选育,其早期选择时间应延后[39];而在4 a、5 a和6 a生红砂家系综合排序中,优良、普通或者较差层次红砂家系均出现较好一致性,重合率绝大部分超过83%,即早期选择抗旱优良红砂家系在选育后的生长过程中依然表现优良,可以获得性状稳定的抗旱性优良红砂家系。杨雪艳[40]认为,卡西亚松(*Pinus kesiya*)经过早期选择亦可获得性质稳定的优良卡西亚松家系。本试验结果表明,红砂进行优良抗旱性早期选择具有可行性,并且最佳选择红砂植株年龄应该在5 a、6 a及以上。赵奋成等[41]认为,优良家系选择可以找出植物最佳选择年龄,湿地松×洪都拉斯加勒比松杂种最佳选择年龄为3~4 a,郝自远等[39]认为,北美鹅掌楸在6 a进行早期选择较为合理。

4 结 论

2014—2018年连续试验选择中,从试验结果得:抗旱性指标Chl a+b、Chl a、MDA、SS、Chl a/b、SP、Pro、F_s、F_m、F_o、F_v、F_v/F_o、Q_Y、qP、PSⅡ、NPQ等16个指标可作为间接指标来评价红砂家系是否具有优良抗旱性;早期选择的抗旱指标累计贡献率达85%以上,抗旱优良红砂家系表现越来越稳定。综合评价分析表明,77个红砂家系中表现优良稳定的5个抗旱红砂家系为小甘沟-3号、巴彦浩特3-4号、乌达-1号、泉眼山-2号、海石湾-1号;还发现红砂实际种植年龄超过5 a植株选育结果可能会更可靠有效。

本研究中从2014年筛选出11个优良抗旱红砂家系(小甘沟-3号、巴彦浩特3-4号、乌达-1号、泉眼山-2号、海石湾-1号、小甘沟-1号、扎子沟2-3号、扎子沟1-2号、临泽-1号、黑山镇3号、扎子沟1-1号),到2018年选择5个抗旱优良家系(小甘沟-3号、巴彦浩特3-4号、乌达-1号、泉眼山-2号、海石湾-1号),选择标准越来越严格,在优良家系中选育抗旱更优良红砂家系。而2018年得到的5个家系其中的4个红砂家系XGG-3、BYHT-3、WD-1、QYS-2,从2014—2018年,每一次选择均入选为优良家系,且排序均靠前,说明红砂早期选择在抗旱指标基础上采用主成分分析法是可行的,且结果稳定,数年选择的重合率超过83%。

参考文献(References):

[1] 汪之波,把光慧. 荒漠植物红砂研究进展[J]. 资源开发与市场,2010,26(12):1124-1126. [Wang Zhibo, Ba Guanghui. Research progress on desert plant of *Reaumuria soongorica* (Pall.) Maxim[J]. Resource Development & Market,2010,26(12):1124-1126.]

[2] 宋雪梅,杨九艳,吕美婷,等. 红砂种子萌发对盐胁迫及适度干旱的响应[J]. 中国沙漠,2012,32(6):1674-1680. [Song Xuemei, Yang Jiuyan, Lyu Meiting, et al. Response of *Reaumuria soongorica* seed germination to salt stress and moderate drought[J]. Journal of Desert Research,2012,32(6):1674-1680.]

[3] 楚秀丽. 不同种源青钱柳苗年生长及叶内含物含量研究[D]. 南京:南京林业大学,2009. [Chu Xiuli. Primary Studies on Seedling Growth and Contents of Chemical Compositions in *Cyclocarya paliurus* Leaves of Different Provenances[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2009.]

[4] 白娟,龚春梅,王刚,等. 干旱胁迫下荒漠植物红砂叶片抗氧化特性[J]. 西北植物学报,2010,30(12):2444-2450. [Bai Juan, Gong Chunmei, Wang Gang, et al. Antioxidative characteristics of *Reaumuria soongorica* under drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2010,30(12):2444-2450.]

[5] 单立山,李毅,任伟,等. 河西走廊中部两种荒漠植物根系构型特征[J]. 应用生态学报,2013,24(1):25-31. [Shan Lishan, Li Yi, Ren Wei, et al. Root architecture of two desert plants in central Hexi Corridor of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2013,24(1):25-31.]

[6] 苏铭,单立山,张正中,等. 荒漠环境梯度下联生红砂(*Reau-*

muria soongorica)、珍珠(*Salsola passerina*)荧光特性[J]. 中国沙漠,2018,38(6):145 - 152. [Su Ming,Shan Lishan,Zhang Zhengzhong,et al. Fluorescence characteristics of *Reaumuria soongorica* and *Salsola passerina* under desert environmental gradient [J]. Journal of Desert Research,2018,38(6):145 - 152.]

[7] 种培芳,苏世平,李毅. 4 个地理种群红砂的抗旱性综合评价[J]. 草业学报,2011,20(5):26 - 33. [Chong Peifang,Su Shiping,Li Yi. Comprehensive evaluation of drought resistance of *Reaumuria soongorica* from four geographical populations[J]. Acta Prataculturae Sinica,2011,20(5):26 - 33.]

[8] 金辉亮,苏世平,李毅,等. 基于光合参数及渗透调节物质不同家系红砂抗旱性的选择[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(7):156 - 161. [Jin Huiliang,Su Shiping,Li Yi,et al. Early selection in drought-resistance of different families of *Reaumuria soongorica* based on photosynthetic parameters and osmoregulation substances [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2017,31(7):156 - 161.]

[9] 王维睿. 基于叶片解剖结构特征的红砂优良家系早期选择[D]. 兰州:甘肃农业大学,2015. [Wang Weirui. Early Stage Seletion of Superior Families of *Reaumuria soongocica* Based on Its Leaf Anatomical Structure[D]. Lanzhou:Gansu Agricultural University,2015.]

[10] 高红霞,苏世平,李毅. 基于渗透调解物质及叶绿素分析红砂抗旱优良家系的早期选择[J]. 应用生态学报,2016,27(1):40 - 48. [Gao Hongxia,Su Shiping,Li Yi. Early selection of drought-resistant superior families of *Reaumuria soongorica* based on the analysis of osmoregulation substances and chlorophyll[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(1):40 - 48.]

[11] Eggleson K K. Stem cell-based therapies:Promises,obstacles,discordance,and the agora[J]. Perspectives in Biology & Medicine,2012,55(1):1.

[12] Bais H P,Vepachedu R,Gilroy S,et al. Allelopathy and etotic plantinvasion:From molecules and genes to species interaction[J]. Science,2003,301:1377 - 1380.

[13] 李艳,王庆,刘国宇,等. 4 种地被植物干旱胁迫下的生理响应及抗旱性评价[J]. 中南林业科技大学学报,2019,39(6):9 - 15. [Li Yan,Wang Qing,Liu Guoyu,et al. Responses of four ground cover plants to drought stress and the comprehensive evaluation on drought resistance capacity[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology,2019,39(6):9 - 15.]

[14] 敖妍. 文冠果优良单株子代测定及初步选择[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(8):177 - 181. [Ao Yan. Progenies test and preliminary selection of *Xanthoceras sorbifolia* plus trees[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2016,30(8):177 - 181.]

[15] 柴文敏,李毅,苏世平,等. 唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)抗旱优良家系的生理特性[J]. 中国沙漠,2017,37(6):110 - 122. [Chai Wenmin,Li Yi,Su Shiping,et al. Early selection of superior families with high drought-resistance in *Nitraria tangutorum* based on the physiological indices[J]. Journal of Desert Research,2017,37(6):110 - 122.]

[16] 马军伟,张含国,刘灵,等. 杂种落叶松幼龄期变异与优良家系初步选择[J]. 东北林业大学学报,2012,40(9):1 - 5. [Ma Junwei,Zhang Hanguo,Liu Ling,et al. Young age variation of hybrid *Larix gmelinii* and preliminary selection of superior families [J]. Journal of Northeast Forestry University,2012,40(9):1 - 5.]

[17] 刘青华,周志春,范辉华,等. 马尾松产脂力与生长性状的家系变异及优良家系早期选择[J]. 林业科学研究,2013,26(6):686 - 691. [Liu Qinghua,Zhou Zhichun,Fan Huihua,et al. Variation for oleoresin yielding capability and growth among families and early selection for superior families in *Pinus massoniana*[J]. Forestry Research,2013,26(6):686 - 691.]

[18] 张含国,张磊,邓继峰,等. 杂种落叶松区域化试验与幼龄期选择[J]. 东北林业大学学报,2010,38(11):1 - 4. [Zhang Hanguo,Zhang Lei,Deng Jifeng,et al. Regional test and juvenile selection on hybrid larch[J]. Journal of Northeast Forestry University,2010,38(11):1 - 4.]

[19] 丁振芳,王景章,方海峰,等. 日本落叶松家系早期选择技术[J]. 东北林业大学学报,1997(3):65 - 67. [Ding Zhenfang,Wang Jingzhang,Fang Haifeng,et al. The early stage selection technology for family system of *Larix kaempferi* [J]. Journal of Northeast Forestry University,1997(3):65 - 67.]

[20] Foti C,Khah E M,Pavli O I. Germination profiling of lentil genotypes subjected to salinity stress[J]. Plant Biology,2018. doi:10.1111/plb.12714.

[21] 孙晓梅,张守攻,侯义梅,等. 短轮伐期日本落叶松家系生长性状遗传参数的变化[J]. 林业科学,2004,40(6):68 - 74. [Sun Xiaomei,Zhang Shougong,Hou Yimei,et al. Age trends of genetic parameters for growth traits in short rotation *Larix kaempferi* families[J]. Scientia Silvae Sinicae,2004,40(6):68 - 74.]

[22] 李玲萍,李岩瑛,孙占峰,等. 河西走廊东部沙尘暴特征及地面气象因素影响机制[J]. 干旱区研究,2019,36(6):1457 - 1465. [Li Lingping,Li Yanying,Sun Zhanfeng,et al. Sandstorm characteristics and influence mechanism of surface meteorological factors in eastern Hexi corridor[J]. Arid Zone Research,2019,36(6):1457 - 1465.]

[23] 焦文慧,张勃,黄涛,等. 近 30 a 河东地区极端气温时空变化[J]. 干旱区研究,2019,36(6):1466 - 1477. [Jiao Wenhui,Zhang Bo,Huang Tao,et al. Temporal and spatial variation of extreme temperature in Hedong region in recent 30 years[J]. Arid Zone Research,2019,36(6):1466 - 1477.]

[24] 赵英永,戴云,崔秀明,等. 考马斯亮蓝 G－250 染色法测定草乌中可溶性蛋白质含量[J]. 云南民族大学学报(自然科学版),2006,15(3):235－237. [Zhao Yingyong, Dai Yun, Cui Xiuming, et al. Determination of soluble protein content in radix *Aconiti kusnezoffii* by coomassie brilliant blue G－250 staining method[J]. Journal of Yunnan University for Nationalities(Natural Science Edition),2006,15(3):235－237.]

[25] 刘浩荣,宋海星,刘代平,等. 油菜茎叶可溶性糖与游离氨基酸含量的动态变化[J]. 西北农业学报,2007,16(1):123－126. [Liu Haorong, Song Haixing, Liu Daiping, et al. Dynamic changes of soluble sugar and free amino acid contents in stem and rape stems and leaf of different oilseed rape varieties[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2007,16(1):123－126.]

[26] 覃勇荣,农艳春,黄江滨,等. 桂西北岩溶地区植物丙二醛和脯氨酸含量比较[J]. Agricultural Science & Technology,2011,12(4):469－473. [Qin Yongrong, Nong Yanchun, Huang Jiangbin, et al. Comparison of MDA and proline contents in plants in Karst areas of Northwest Guangxi[J]. Agricultural Science & Technology,2011,12(4):469－473.]

[27] 魏传斌,张萍,覃芸,等. 宜兴百合叶片与鳞茎对干旱胁迫的生理响应[J]. 安徽农业科学,2010,38(7):3393－3394,3411. [Wei Chuanbin, Zhang Ping, Qin Yun, et al. Physiological responses of *Lilium lancifolium* leaf and bulb to drought stress[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2010,38(7):3393－3394,3411.]

[28] Peterson R B, Havir E A. The multiphasic nature of nonphotochemical quenching: Implications for assessment of photosynthetic electron transport based on chlorophyll fluorescence[J]. Photosynthesis Research,2004,82(1):95－107.

[29] Earl H J, Ennahli S. Estimating photosynthetic electron transport via chlorophyll fluorometry without photosystem II light saturation[J]. Photosynthesis Research,2004,82(2):177－186.

[30] Hendrickson L, Furbank R T, Chow W S. A simple alternative approach to assessing the fate of absorbed light energy using chlorophyll fluorescence[J]. Photosynthesis Research,2004,82(1):73－81.

[31] 胡文杰,王晓荣,胡兴宜,等. 枫香优良种源及家系早期选择[J]. 东北林业大学学报,2017,45(6):7－13. [Hu Wenjie, Wang Xiaorong, Hu Xingyi, et al. Early election of superior provenances and families of *Liquidambar formosana*[J]. Journal of Northeast Forestry University,2017,45(6):7－13.]

[32] 熊涛,邓冬丽,王建忠,等. 赤桉第二代家系遗传变异及早期选择研究[J]. 中南林业科技大学学报,2017,37(5):31－35. [Xiong Tao, Deng Dongli, Wang Jianzhong, et al. Study on genetic variation and early selection of *Eucalyptus camaldulensis* second generation family[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology,2017,37(5):31－35.]

[33] 武兴波,兰士波,宁小光. 老爷岭红皮云杉子代变异分析及优良个体的早期选择[J]. 中国林副特产,2017(6):15－18,24. [Wu Xingbo, Lan Shibo, Ning Xiaoguang. Variation analysis of *Picea koraiensis* progeny in Laoyeling and early selection of superior individuals[J]. Forest By-Product and Speciality in China,2017(6):15－18,24.]

[34] 王志昊. 几种沙生植物抗旱性评价[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2018. [Wang Zhihao. Drought Resistance Evaluation of Several Sand Plants[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2018.]

[35] 王婧,李培,陈晓阳,等. 黄樟种源、家系早期生长性状变异与初步选择[J]. 中南林业科技大学学报,2018,38(2):57－63. [Wang Jing, Li Pei, Chen Xiaoyang, et al. Variation and preliminary selection of early growth traits of *Cinnamomum camphora* provenances and families[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology,2018,38(2):57－63.]

[36] 耿东梅,单立山,李毅,等. 土壤水分胁迫对红砂幼苗叶绿素荧光和抗氧化酶活性的影响[J]. 植物学报,2014,49(3):282－291. [Geng Dongmei, Shan Lishan, Li Yi, et al. Effects of soil water stress on chlorophyll fluorescence and antioxidant enzyme activities of *Reaumuria soongorica* seedlings[J]. Chinese Bulletin of Botany,2014,49(3):282－291.]

[37] 郑淑霞,上官周平. 8 种阔叶树种叶片气体交换特征和叶绿素荧光特性比较[J]. 生态学报,2005,26(4):1080－1087. [Zheng Shuxia, Shangguan Zhouping. Comparison of leaf gas exchange characteristics and chlorophyll fluorescence characteristics of 8 broad-leaved tree species[J]. Acta Ecologica Sinica,2005,26(4):1080－1087.]

[38] 张金鑫,张景波,卢琦,等. 人工模拟降雨变化对白刺(*Nitraria tangutorum*)生理生态特征的影响[J]. 中国沙漠,2018,38(4):747－755. [Zhang Jinxin, Zhang Jingbo, Lu Qi, et al. Effects of artificial rainfall simulation on physiological and ecological characteristics of *Nitraria tangutorum*[J]. Journal of Desert Research,2018,38(4):747－755.]

[39] 郝自远,李火根,康昊,等. 北美鹅掌楸人工林生长规律及早期选择可行性探究[J]. 林业科学研究,2017,30(5):878－885. [Hao Ziyuan, Li Huogen, Kang Hao, et al. Study on growth law and feasibility of early selection of *Liriodendron tulipifera*[J]. Forestry Research,2017,30(5):878－885.]

[40] 杨雪艳. 卡西亚松生长节律及家系早期选择研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2018. [Yang Xueyan. Growth Rhythm and Early Selection for Young *Pinus kesiya* Planations of Half-Sib Families in South Yunnan, China[D]. Beijing: China Forestry Research Institute,2018.]

[41] 赵奋成,林昌明,吴惠姗,等. 湿地松×洪都拉斯加勒比松生长

性状遗传参数年度变化趋势及相关分析[J]. 林业与环境科学,2018,34(2):5 – 16. [Zhao Fencheng, Lin Changming, Wu Huishan, et al. Annual variation trend and correlation analysis of genetic parameters of growth traits of *Pinus elliottii* × *Pinus caribaea*[J]. Forestry and Environmental Science, 2018, 34(2):5 – 16.]

Early selection and evaluation of superior families with drought resistance in *Reaumuria soongorica*

LI Pei-pei, LI Yi, SU Shi-ping, CHONG Pei-fang, LI Zhen

(*College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *Gansu*, *China*)

Abstract: This experiment was conducted in Liangzhou District of Wuwei City to establish experimental sites for seedling raising. The leaves of families of *Reaumuria soongorica* (i. e. 2 a, 3 a, 4 a, 5 a, 6 a-bearing *Reaumuria soongorica*) were used as experimental materials in July 2014, 2015, 2016, 2017, and 2018 respectively. The indexes of soluble protein (SP), soluble sugar (SS), malondialdehyde (MDA), proline (Pro), chlorophyll a (Chl a), chlorophyll b (Chl b), total chlorophyll (Chl a + b), chlorophyll a/b (Chl a/b), and chlorophyll fluorescence in leaves were measured, and the feasibility of early selection for drought resistance and stability of character performance of each of the *Reaumuria soongorica* families were studied for five consecutive years. *Reaumuria soongorica* families with excellent drought resistance were selected and comprehensively evaluated. The results showed significant differences in SP, soluble sugar, proline, and chlorophyll fluorescence related indexes among the 77 tested *Reaumuria soongorica* families, which allowed the selection of *Reaumuria soongorica* families with good drought resistance. After five years of continuous observation and measurement, the ranking of 2 a, 3 a, and 4 a *Reaumuria soongorica* families was found to be consistent irrespective of the year, with coincidence rates gradually increasing to 83.33%. The coincidence rate of 5 a and 6 a *Reaumuria soongorica* families at all levels is stable, with coincidence rates being greater than 83.33%. Following comprehensive analysis, the five most drought-resistant families were selected, including Xiaogangou – 3 (XGG – 3), Bayanhaote – 3 – 4 (BYHT – 3), Wuda – 1 (WD – 1), Quanyanshan – 2 (QYS – 2), and Haishiwan – 1 (HSW – 1), with a selection rate of 6.49%.

Key words: drought resistance; early selection; *Reaumuria soongorica* family; evaluation